

8. Дубейковский В.И. Эффективное моделирование с СА ERwin Process Modeler (BPwin; AllFusion Process Modeler) / В.И. Дубейковский. – М.: Диалог–МИФИ, 2009. – 384 с.
9. Маклаков С.В. Создание информационных систем с AllFusion Modeling Suite / С.В. Маклаков. – М.: ДИАЛОГ–МИФИ, 2003. – 432 с.
10. Дейт К.Дж. Введение в системы баз данных. Пер. с англ. 8-е изд. / К.Дж. Дейт. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1328 с.
11. Маклаков С.В., Туманов В.Е. Проектирование реляционных хранилищ данных. – М.: Диалог–МИФИ, 2007. – 336 с.
12. Гамильтон Б. ADO.NET. Сборник рецептов. – СПб.: Питер, 2005. – 576 с.
13. Троелсен Э. Язык программирования C# 5.0 и платформа .NET 4.5. – 6-е изд. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2015. – 1312 с.
14. Флёнов М.Е. Библия C#. – 2-е изд. – СПб.: БХВ–Петербург, 2011. – 560 с.
15. Ларсон Б. Разработка бизнес-аналитики в Microsoft SQL Server 2005 / Б. Ларсон. – СПб.: Питер, 2008. – 684 с.
16. Ларсон Б. Microsoft SQL Server 2005 Reporting Services. Традиционные и интерактивные отчеты. Создание, редактирование и управление / Б. Ларсон. – М.: НТ Пресс, 2008. – 608 с.
17. Спирин Н.А. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки металлургии / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев [и др.]; под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – 462 с.
18. Онорин О.П. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / О.П. Онорин, Н.А. Спирин, В.Л. Терентьев [и др.]; под ред. Н. А. Спирина. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. – 301 с.
19. Спирин Н.А. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП: учебное пособие / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев [и др.]; под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – 558 с.
20. Информационные системы в металлургии: учебник для вузов / Н.А. Спирин, Ю.В. Ипатов, В.И. Лобанов [и др.]; под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2001. – 617 с.
21. Spirin N.A. Use of contemporary information technology for analyzing the blast furnace process / N.A. Spirin, V.V. Lavrov, V.Y. Rybolovlev, A.V. Krasnobaev, A.V. Pavlov // Metallurgist. 20 October 2016. – Pp. 1–7.

УДК 536

В. Г. Лисиенко, Г. К. Маликов, Ю. К. Маликов, Е. М. Шлеймович, Д. Л. Лобанов
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

РАЗВИТИЕ МЕТОДА СТРУЙНО-ФАКЕЛЬНОГО ОТОПЛЕНИЯ ДЛЯ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ И СИСТЕМ ПРЯМОГО НАГРЕВА ВОЗДУХА ДЛЯ ВЕНТИЛЯЦИИ ШАХТ

Аннотация

Представлены отечественные разработки метода струйно-факельного отопления (СФО), позволившие не только повысить КПД современных нагревательных печей до 65 %, но и радикально снизить эмиссию оксидов азота (не более 30 ppm, даже при подогреве воздуха, идущего на горение, до 650 °С). Рассмотрена ограниченная применимость традиционных горелочных устройств для прямого нагрева приточного воздуха с учетом отечественных санитарных норм. Показана эффективность использования технологии СФО для прямого нагрева воздуха (ПНВ), подаваемого на проветривание шахт, позволившая полностью отказаться от использования водяных калориферов. Концентрации вредных

веществ: азота оксидов, азота диоксида, серы диоксида, углерода оксида, бензапирена, твердого аэрозоля в подаваемом в шахту воздухе не превышают существующего регламента. При этом по сравнению с традиционной схемой (центральная котельная – теплосеть – водяной калорифер) обеспечивается экономия природного газа в 3 раза, снижение выбросов оксида углерода в 30 раз, а оксидов азота в 200 раз.

Ключевые слова: струйно-факельное отопление, нагревательные печи, природный газ, приточный воздух, вентиляция шахт, системы прямого нагрева воздуха, оксиды азота, оксид углерода.

Abstract

Direct Flame Impingement Method is presented. Advantages of this method provide increasing the efficiency of modern heating furnaces to 65%, and also radically reducing the emission of nitrogen oxides (no more than 30 ppm, even when the combustion air was heated to 650 °C). The limited applicability of traditional burner devices for direct heating systems in conditions of sanitary standards is considered. The efficiency of using jet-burners technology for direct air heating, applied to the ventilation of the mines, is shown. The ability to exchange water heaters is shown also. Concentrations of harmful substances: nitrogen oxides, nitrogen dioxide, sulfur dioxide, carbon oxide, benzopyrene solid aerosol in the heated air does not exceed the existing limit values. In this case, natural gas consumption has been reduced by 3 times, carbon emissions have been reduced by 30 times, and nitrogen oxides – by 200 times, compared to the traditional scheme (central boiler – water heater).

Key words: jet-burners heating, heat furnaces, natural gas, fresh air, mine ventilation, direct air heating systems, nitrogen oxides, carbon oxide.

Введение

Для нашей страны весьма актуальны задачи разработки и широкого внедрения современных высокоэкономичных и экологически чистых технологий и технических систем, предназначенных как для нагрева изделий, так и для отопления и вентиляции промышленных объектов (цехов, шахт) при сжигании природного газа – органического топлива с наиболее высокими потребительскими свойствами. В данной работе предложено решение указанных задач на основе прогрессивного направления в отечественном печестроении [1, 2] – прямого нагрева при бестуннельном струйно-факельном сжигании газообразного топлива.

Прямой струйно-факельный нагрев металла

Струйно-факельный нагрев (СФН) металла [1–3] осуществляется системой гомогенных факелов (горящих импактных струй заранее подготовленной газозооушной смеси), непосредственно взаимодействующих с нагреваемой поверхностью. Следующие основные особенности СФН хорошо демонстрируют его преимущества перед традиционными, в частности, с туннельными горелками, методами нагрева и термообработки металла в печах:

- горение струй предварительно подготовленной смеси организуется без использования горелочных туннелей и выносятся в рабочий объем печи, при этом факел направляется непосредственно на поверхность нагреваемой заготовки (рис. 1);
- быстрый и равномерный нагрев заготовок (листа, трубы) достигается при размещении в кладке печи многосопловых неохлаждаемых горелок с калиброванными соплами, изготовленными из жаропрочной стали;
- большая скорость истечения смеси (100–300 м/с) исключает проскок пламени в горелку, предохраняет сопла от перегрева и обеспечивает коэффициент конвективной теплоотдачи у поверхности заготовок 150–250 Вт/(м² К);
- конструктивная простота дает возможность размещать достаточное для самых разнообразных условий нагрева число сопел на единицу поверхности металла (от 10 до 200 на 1 м²) и тем самым оптимизировать как тепловую эффективность схемы отопления, так и уровень экологической чистоты продуктов горения.

Исследования [4] показали, что в печах СФН одновременно реализуется сразу несколько известных способов подавления эмиссии оксидов азота:

- снижение температуры горения (в результате интенсивной теплоотдачи к нагреваемому металлу);
- увеличение кратности циркуляции (большое число струй и их высокая скорость);
- исключение локально перегретых зон газовой среды в рабочем объеме печи (вследствие предварительного перемешивания и отсутствия горелочных камней).

Естественно поэтому, что в системах СФН должен проявляться эффект от комбинированного воздействия всех этих способов. Выяснилось также, что в печах СФН оксиды азота образуются в основном по так называемому быстрому механизму, их эмиссия близка к минимально возможной и практически не зависит от температуры воздуха горения (для исследованного диапазона подогрева воздуха 100–400 °С) (рис. 2).

Создание и развитие научных основ СФО и практическая реализация эффективных систем струйно-факельного нагрева осуществлялась на базе математических моделей, разработанных на основе современных методов вычислительной гидродинамики турбулентных реагирующих потоков и последних достижений радиационного и сложного теплообмена [5]. В дальнейшем модель была усовершенствована для возможности вычисления эмиссии как термических, так и быстрых оксидов азота с учетом кинетики их образования в промышленных горелочных устройствах [4]. При этом расчетно-теоретический анализ сопровождался комплексными экспериментальными исследованиями на стендах и опытно-промышленных установках. Эти работы были выполнены во ВНИИМТе под руководством Г.К. Маликова и в УГТУ–УПИ под руководством В.Г. Лисиенко.

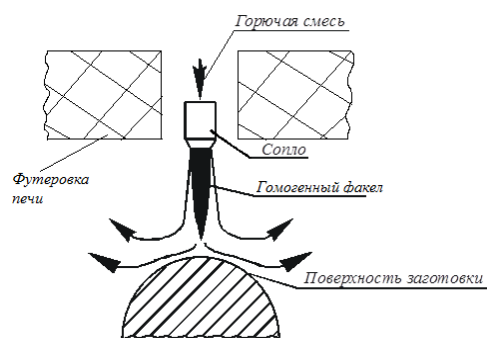


Рис. 1. Схема СФН (показано одно из сопел многосопловой горелки)

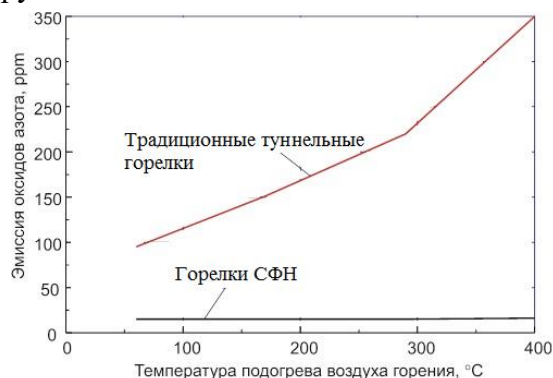


Рис. 2. Зависимость эмиссии NO_x от температуры подогрева воздуха

Детальное исследование особенностей тепловой работы печей СФН было предпринято на опытной печи в совместных исследованиях российских и американских специалистов [2]. С американской стороны в этих исследованиях активное участие принимали Р. Висканта, М. Хинкис, Дж. Вагнер, И. Курек и др. Печь была установлена в опытном цехе Института технологий газа в Чикаго (США) и оборудована самыми современными, часто оригинальными, приборами для измерения расходов, температур, составов продуктов горения и т.д. Расход природного газа достигал 30 м³/ч, подогрев воздуха удавалось поднять до 650 °С. На этой печи были подтверждены ранее установленные и получены многие дополнительные данные по преимуществам СФН. В частности, тепловой КПД достигал 65 %, эмиссия оксидов азота, даже при подогреве воздуха до 650 °С, не превышала 30 ppm против 240–250 ppm на обычных печах. Отметим, что в зарубежной практике печестроения реализация СФН происходила значительно позднее [6] в виде DFI (Direct Flame Impingement) технологий в соединении с повышением потенциала топливной смеси за счет обогащения окислителя кислородом (Oxy-fuel).

Отметим также, что хотя в печах СФН организовано горение газозвушной смеси практически стехиометрического состава, струйно-факельные горелочные устройства могут устойчиво работать и в достаточно широком диапазоне изменения коэффициентов расхода воздуха. Так, в системах ПНВ для вентиляции шахт, о которых речь пойдет далее, происходит сгорание струй предварительно перемешанной смеси природного газа с большим избытком воздуха (вблизи нижнего концентрационного предела распространения пламени при

значениях $\alpha = 1,6-1,7$).

Системы ПНВ ООО «Газ-Инжиниринг» для вентиляции шахт

Для подогрева свежего воздуха, подаваемого в производственные помещения или в шахту в холодный период года, до установленной нормативными документами температуры традиционным способом является нагрев с помощью водяных калориферов. Воду нагревают в местных котельных или централизованно на ТЭЦ, откуда она по системе трубопроводов подается потребителям. Недостатки этого способа хорошо известны: значительная металлоемкость (с учетом генератора тепла, теплотрасс и теплоиспользующих установок), довольно низкий коэффициент использования химического тепла топлива (50–80%), наличие в системе легко замерзающего теплоносителя. Последнее создает опасность аварийных ситуаций и, как следствие, большого экономического ущерба, в особенности для районов с суровыми климатическими условиями. Понятно также, что ни ТЭЦ, ни котельные не относятся к экологически чистым объектам, даже если они работают на природном газе.

Весьма перспективным представляется использование систем ПНВ для вентиляции шахт. При таком способе подогрева приточного воздуха, посредством сжигания газа в потоке подогреваемого воздуха, генераторы тепла устанавливают непосредственно у вентиляционных стволов, что исключает необходимость прокладки многокилометровых тепловых сетей. Такого рода системы подогрева имеют исключительно низкую металлоемкость, а коэффициент использования химического тепла практически составляет 100%. Отсутствие же в системах легко замерзающего теплоносителя делает их высоконадежными.

Однако широкое применение систем ПНВ в нашей стране сдерживается, прежде всего, высокими требованиями к горелочным устройствам в части выброса вредных веществ, исходя из отечественных гигиенических нормативов на содержание вредных веществ в приточном воздухе [7–9].

В качестве основных загрязнителей при сжигании природного газа выступают оксиды азота и оксид углерода. При проветривании шахт для учета суммации этих веществ остронаправленного действия используется понятие условной окиси углерода, массовая концентрация которой определяется как

$$[\text{CO}_x] = 4 [\text{NO}_x] + [\text{CO}], \quad (1)$$

где $[\text{CO}]$ – массовая концентрация оксида углерода, мг/м^3 ; $[\text{NO}_x]$ – массовая концентрация оксидов азота в пересчете на NO_2 , мг/м^3 .

Концентрация условной окиси углерода в приточном воздухе не должна превышать 30 % ПДК в воздухе рабочей зоны:

$$[\text{CO}_x] < 0,3 \cdot 20 = 6 \text{ мг/м}^3. \quad (2)$$

В качестве расчетного интервала температуры подогрева воздуха для проветривания шахт Уральского региона можно принять величину 44°C (от -41°C до $+3^\circ\text{C}$). Для подогрева на 44°C 1 м^3 воздуха при стандартных условиях ($t = 20^\circ\text{C}$, $p = 760 \text{ мм рт. ст.}$) требуется $0,00121 \cdot 44 = 0,0533 \text{ МДж}$. Это количество тепла соответствует низшей теплоте сгорания природного газа, поскольку расчет показывает [10], что относительная влажность воздуха, подаваемого в помещение через установку прямого нагрева, будет всегда ниже влажности наружного воздуха. В связи с тем, что нормирование выбросов проводится, как правило, на высшую рабочую теплоту сгорания природного газа (которая на 11 % больше), значение 0,0533 следует заменить на 0,059. С учетом (2), получаем требование к выбросам для горелочного устройства прямого нагрева воздуха для проветривания шахт:

$$[\text{CO}_x] < 6/0,059 = 102 \text{ мг/МДж}. \quad (3)$$

В верхней части табл. 1 приведены данные по выбросам от струйно-диффузионных горелочных устройств с уголковым перфорированным стабилизатором различных производителей. Именно этот тип горелочных устройств обычно используется для ПНВ [10–12].

Таблица 1

Ориентировочные значения выбросов вредных веществ в смесительных воздухонагревателях при сжигании природного газа по технологиям струйно-диффузионного и струйно-факельного отопления

Горелка	Выброс вредных веществ, мг/МДж				
Технология сжигания газа	Тип	Фирма	CO	NO _x	CO _x *)
Струйно-диффузионная с уголковым перфорированным стабилизатором	AIRFLO NP-1	MAXON, США	50	35	190
	AIRFLO RG-IV	MAXON, США	45	25	145
	АН-МА	Eclipse Combustion, США	80	30	200
	STARWEIN	SARGI, Франция	60	40	220
Струйно-факельная с большим избытком воздуха горения	РГ 2000 М	ООО «Газ-Инжиниринг», Россия, г. Екатеринбург	5,0	1,5	11

*) в пересчете на условную окись углерода $[CO_x] = [CO] + 4[NO_x]$.

Для этих конструкций (рис. 3) было установлено, что смесительные воздухонагреватели, исходя из отечественных санитарных норм для ПДК рабочей зоны, не могут использоваться в качестве единственного источника тепла [11, 12]. И, следовательно, использование систем ПНВ для вентиляции шахт должно осуществляться по двухступенчатой схеме, то есть в дополнение к существующим водяным калориферам [12, 13].

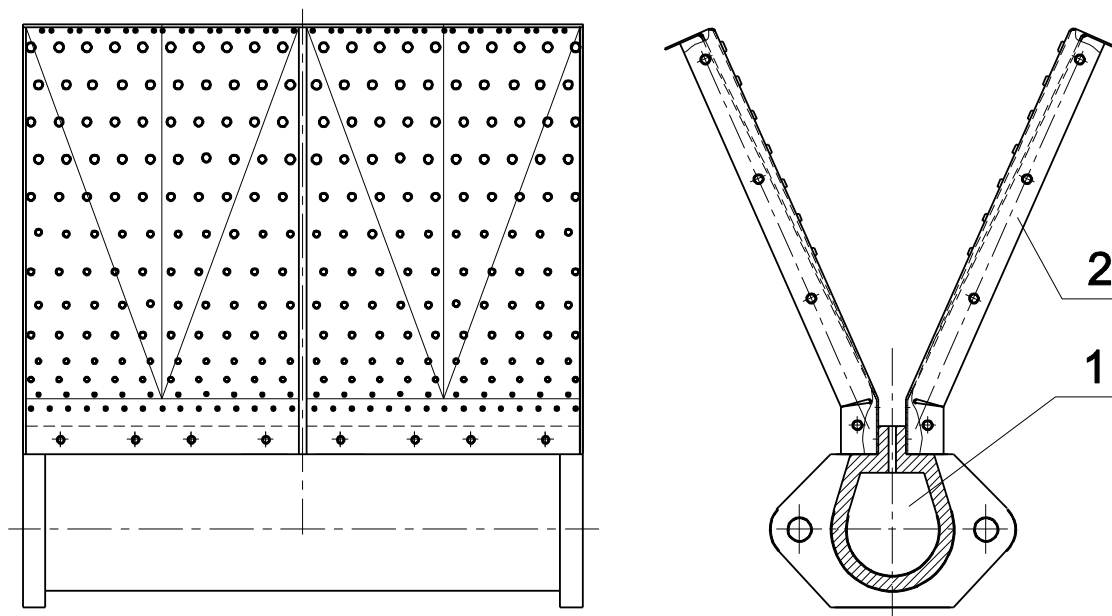


Рис. 3. Струйно-диффузионная горелка с центральным подводом газа:

- 1 – газовый коллектор с центральными соплами;
- 2 – перфорированный уголковый стабилизатор

Для существенного снижения образования вредных веществ и полного отказа от использования водяных калориферов в воздухонагревателе РГ 2000 М производства ООО «Газ-Инжиниринг» организовано сгорание предварительно перемешанной смеси по струйно-факельной технологии с большим избытком воздуха. Процесс осуществляется при температуре 1 150–1 250 °С вблизи нижнего концентрационного предела распространения

пламени ($\alpha = 1,6-1,7$). Удельные выбросы при работе РГ 2000 М приведены в нижней строке таблицы 1.

Системы ПНВ, основанные на рассмотренной технологии СФО сверхчистого сжигания природного газа и позволившие полностью отказаться от использования водяных калориферов, были установлены на шахтах «Кальинская» и «Красная шапочка» ОАО «СУБР» в 2005 году. Структура загрязнения поступающего на проветривание шахты воздуха при температуре наружного воздуха $-39\text{ }^{\circ}\text{C}$, с учетом ПНВ до температуры $2-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ разобрана в [14].

Приведенные в [14] данные демонстрируют высокий уровень безопасности установленных систем ПНВ, что подтверждают результаты лабораторного контроля, выполненного специалистами Роспотребнадзора и ЕМНЦ. Установлено, что реализованные в РГ 2000 М концентрационно-температурные режимы окисления метана обеспечивают практически полное подавление механизмов образования таких вредных веществ как бенз(а)перен. В заметных количествах в продуктах сгорания природного газа после РГ 2000 М можно обнаружить только оксиды азота и оксид углерода. Данные исследований [15] показывают, что при соблюдении проектных режимов эксплуатации системы ПНВ во все периоды отопительного сезона (межсезонье, умеренные морозы, самый холодный месяц) концентрации вредных веществ: азота оксидов, азота диоксида, серы диоксида, углерода оксида, бенз(а)пирена, твердого аэрозоля в подаваемом в шахту воздухе не превышают существующего регламента. По сравнению с традиционной схемой (центральная котельная – теплосеть – водяной калорифер) обеспечивается экономия природного газа в 3 раза, снижение выбросов оксида углерода в 30 раз, а оксидов азота в 200 раз.

Выводы

ВНИИМТ и УГТУ–УПИ разработаны научные основы, математические модели и конструкции секционных печей со струйно-факельной системой отопления (печи СФН), которые обеспечивают значительную интенсификацию теплообмена за счет удара (натекания) горящих струй о поверхность нагреваемых заготовок. Печи СФН отличаются простотой конструкции, компактностью и малой тепловой инерционностью. Метод струйно-факельной интенсификации нагрева металла обеспечивает уменьшение габаритов печей при увеличении их производительности, резкую экономию огнеупорных материалов, снижение удельных расходов топлива и эмиссии оксидов азота.

Системы ПНВ на базе смесительных воздухонагревателей РГ 2000 М производства ООО «Газ-Инжиниринг» хорошо зарекомендовали себя при использовании как для подогрева приточного воздуха на промышленных предприятиях, так и для вентиляции шахт, особенно в климатически суровых районах. На январь 2017 г. такие системы установлены и успешно эксплуатируются уже на 14 шахтах. Значительная эффективность применения таких систем хорошо обоснована с позиций энергосбережения и охраны окружающей среды. Это позволяет рекомендовать их для широкого использования в различных отраслях промышленного производства, в частности, для вентиляции шахт в условиях Севера.

Список использованных источников

1. А.с. 726400 СССР. Проходная печь для скоростного нагрева металла / Г.К. Маликов, Ф.Р. Шкляр, Д.Л. Лобанов и др. Опубл. 05.04.1980.
2. Lisienko V.G. and Shleimovich E.M. // *Refractories and Industrial Ceramics*. Vol. 54. No September. 2013. P. 188–195.
3. Лисиенко В.Г., Маликов Г.К., Маликов Ю.К. и др. // *Сталь*. 1996. №6. С. 45–48.
4. Маликов Г.К., Лисиенко В.Г., Маликов К.Ю. и др. // *Сталь*. 2002. № 2. С. 91–96.
5. Лисиенко В.Г., Маликов Г.К., Маликов Ю.К. и др. // *Энергетика вузов и энергетических объединений СНГ*. 2001. № 1. С. 69–78.
6. Сорока Б.С. // *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2012. №2. С. 54–68.
7. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» от

11.12.2013 № 599.

8. НиП 41–01–2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование.
9. СП 2.2.1.1312–03. Гигиенические требования к проектированию вновь строящихся и реконструируемых промышленных предприятий.
10. Thurley J. // Industrial Process Heating. 1970. Vol. 10. No 1. P. 30–38.
11. Колядич М.Н., Гринберг А.А., Жигалов В.П. // Гигиена и санитария. 1985. № 4. С. 36–38.
12. Царев В.К., Ляпаков В.М., Капошилов А.Н. и др. // Промышленная энергетика. 1993. № 6. С. 21–22.
13. Мысляков А.Л., Плотников В.В., Балдин Д.А. // Безопасность труда в промышленности. 2003. № 11. С. 11–12.
14. Кравченко А.Н., Маликов Ю.К., Мысляков А.Л. и др. // Безопасность труда в промышленности. 2005. № 10. С. 22–24.
15. Величковский Б.Т., Маликов Ю.К., Троицкая Н.А. и др. // Гигиена и санитария. 2011. № 4. С. 41–45.

УДК 669.162

В. Г. Лисиенко, А. В. Лаптева, Ю. Н. Чесноков

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

СКВОЗНОЙ ЭНЕРГОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ: НОВЫЕ ПОДХОДЫ

Аннотация

В статье рассмотрены основные понятия сквозного энергоэкологического анализа, базирующихся на технологических топливных числах, которые измеряются в килограммах условного топлива на тонну продукции. В килограммах условного топлива на тонну продукции измеряются вредные выбросы в форме технологического экологического числа, которое переводит платы предприятия за ущерб, нанесенный природе в энергетические единицы. Введено технологическое парниковое число, переводящее плату предприятия за выбросы парниковых газов в килограммы условного топлива на тонну продукции. Энергетические затраты, произведенные при строительстве или ремонте агрегатов, цехов, которые представлены в виде амортизационных отчислений, представлены технологическим амортизационным числом. Так как все перечисленные параметры приведены к единой системе единиц, то можно рассматривать их ту или иную сумму в качестве характеристики того или иного процесса. Взвешенная сумма перечисленных параметров – технологическое топливно-эколого-парниковое число энергоэкологического анализа, позволяет выявить наилучшие доступные технологии для внедрения.

Ключевые слова: сквозной энергоэкологический анализ, технологическое амортизационное число, технологическое парниковое число, цена природного газа, теплота сгорания условного топлива.

Abstract

In article the basic concepts of the through power ecological analysis, based on technological fuel numbers which are measured in kilograms of conditional fuel on production ton are considered. Harmful emissions in the form of technological ecological number which translates payments of the enterprise for damage caused the nature in power units are measured in kilograms of conditional fuel on ton of production. The technological greenhouse number transferring a payment of the enterprise for emissions of greenhouse gases in kilograms of conditional fuel to production ton is entered. The power expenses made at construction or repair of units, shops which are presented in the form of depreciation charges are presented by technological depreciation number. As all listed